第27卷 第3期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.3
2015年5月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY May 2015

专题介绍

油气田高温高压条件下CO_2腐蚀缓蚀剂的研究进展

程远鹏[1,2] 李自力[1] 刘倩倩[1] 毕海胜[1] 白 羽[2]
1. 中国石油大学储运与建筑工程学院 青岛 266580;
2. 长江大学石油工程学院 武汉 430100

摘要: 对近年来国内外开展的有关高温高压环境下CO_2腐蚀缓蚀剂的研究进行综述,讨论了缓蚀剂的作用机理,评述了抑制CO_2腐蚀常用的咪唑啉类、有机胺类、季铵盐类等缓蚀剂在国内外的研究与应用状况,展望了这一领域的研究前景和发展方向。

关键词: CO_2 腐蚀 缓蚀剂 油气田 高温高压
中图分类号: TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6495(2015)03-0278-05

1 前言

CO_2通常作为伴生气或天然气的组分之一存在于油气中,同时随着CO_2的驱油驱气工艺以及酸化压裂技术的使用,CO_2腐蚀问题变得越来越突出。通常,干燥的CO_2对金属没有腐蚀,但在潮湿环境中或者溶于水后,在相同pH值条件下,CO_2对金属的腐蚀比盐酸还要严重[1]。我国的油气资源均有生产井深、杂质多、腐蚀严重的特点[2]。油气储运和生产过程中环境的温度、压力常常高于常温常压,在这种环境条件下,腐蚀不仅造成严重的经济损失[3],引发安全事故,而且对水资源和环境也造成了严重污染[4]。

添加缓蚀剂是金属腐蚀防护中最有效的、廉价的方法,在石油天然气开采和集输过程中得到了广泛的应用。缓蚀剂是通过其分子上极性基团的物理吸附作用或化学吸附作用,使缓蚀剂吸附在金属表面上。这样,一方面使金属表面的能量状态趋于稳定,提高腐蚀反应的活化能,从而减慢腐蚀速度;另一方面能在金属表面形成一层疏水性保护膜,以阻碍腐蚀[5]。

针对高温高压CO_2油气田井下环境,国外缓蚀剂的研究开发技术较为成熟,研究方向主要集中于磷酸脂类、烷基吡啶、咪唑啉和乙氧基磺酸盐等有机缓蚀剂,国内的高温缓蚀剂主要为酸化缓蚀剂,其主要成分为醛、酮、胺缩合物、咪唑啉衍生物、吡啶、喹啉季铵盐、杂多胺和复合添加增效剂如甲醛、炔醇以及高分子聚合物等。就目前情况来看,国内外开发的高温缓蚀剂 (主要是酸化缓蚀剂) 普遍存在用量大 (酸化缓蚀剂的加量一般为1%~2%) 和成本高的问题,而且在缓蚀剂应用方面开展的研究工作也相对匮乏,针对油气田高温高压条件的缓蚀剂很少[6],尤其是在温度高于150 ℃、总压大于10 MPa的高矿化度环境的井下缓蚀剂尚未见报道。并且现有的高温高压条件下缓蚀剂研究多为实验室模拟油气田实际生产环境的数据,缺少实际现场数据的验证。

针对上述情况,本文评述了国内外现已形成的油气田高温高压条件CO_2腐蚀缓蚀技术的研究进展状况,为高温高压条件下抗CO_2腐蚀缓蚀剂的研究提供理论依据。

2 咪唑啉类缓蚀剂

咪唑啉类缓蚀剂制备方法相对简单,原料易得,在石油天然气生产中应用广泛,对含CO_2的体系有良好的缓蚀效果,咪唑啉缓蚀剂的基本结构如图1所示,分子结构中有憎水的碳氢长链R_1和亲水的带活性基团的侧链R_2,通过对憎水基团R_1和亲水基团R_2进行改性、优化可以得到不同品种的缓蚀剂。

目前,抗CO_2腐蚀的缓蚀剂中仍然是咪唑啉及其衍生物的用量最大。Mustafa等[7]研究了一种咪唑啉

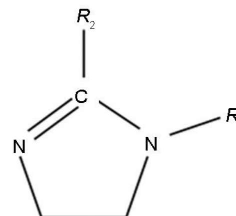


图1 咪唑啉缓蚀剂基本结构示意图

定稿日期: 2014-06-30
基金项目: 国家科技重大专项课题项目 (2011ZX05017-004) 资助
作者简介: 程远鹏,男,1981年生,博士生
通讯作者: 李自力,E-mail: lizili@upc.edu.cn,研究方向为石油与天然气储运系统安全评价
DOI: 10.11903/1002.6495.2014.193

缓蚀剂在60 ℃，缓蚀剂浓度从10 mg/L到100 mg/L，压力从1 MPa到6 MPa，测量腐蚀速率并分析实验数据发现，在实验范围内缓蚀率最高可达93%。缓蚀剂的加入，使腐蚀产物膜变的更加复杂[8]，达到了减小腐蚀速率的目的，表现出良好的缓蚀性能。Zhao等[9]对P110钢在80 ℃高温，CO_2分压为0.8 MPa条件下，测得咪唑啉衍生物的缓蚀效率较高，具有良好的缓蚀性能。

但是，单一的咪唑啉类缓蚀剂已难以满足高温高压环境下的生产要求，研究发现高温高压条件下缓蚀效果显著的多数为咪唑啉类缓蚀剂与其他缓蚀剂、表面活性剂等药品复配所得缓蚀剂。Okafor等[10]研究了咪唑啉盐松香酰胺咪唑啉(RAIM)缓蚀剂在不同条件下的缓蚀性能。采用电化学方法在20、40和60 ℃下测试了N80钢和P110钢在添加了RAIM缓蚀剂的饱和CO_2模拟地层水中的极化曲线和EIS曲线，通过分析曲线数据发现，在实验范围内，缓蚀率与缓蚀剂浓度、实验温度成正比，且缓蚀效果显著，缓蚀率均在90%以上。温度较高时，缓蚀剂对P110钢的缓蚀效果优于对N80钢的效果。尹成先等[11]开发了一种新型咪唑啉季铵盐固体缓蚀剂(常温下为固体)，该缓蚀剂在120 ℃和20 MPa、CO_2分压高达3.5 MPa的油井模拟环境中具有较好的缓蚀性能，符合西部油田苛刻的腐蚀环境要求。尹成先等[12]在30 MPa实验压力、120 ℃实验温度下测得该缓蚀剂缓蚀率为86.5%，又将硫脲复配入这种咪唑啉季铵盐固体缓蚀剂得到新型咪唑啉缓蚀剂，在实验压力为30 MPa、环境温度分别为90和120 ℃条件下测得复配缓蚀剂的缓蚀率分别为86.5%和63.8%，具有良好的抗CO_2高温高压腐蚀性能。梅平等[13]采用自制的高温高压静态腐蚀试验装置，针对N80钢，在实验温度70 ℃、CO_2分压1.5 MPa条件下，筛选出能抑制CO_2腐蚀的缓蚀体系JS(电缓蚀剂JB和辅剂SM组成)，缓蚀率高达97.73%，腐蚀速率v_c<0.076 mm/a，符合水腐蚀性行业标准(SY/T5329-94)，不存在轻微点蚀，达到石油天然气行业标准，是一种性能优良的复配缓蚀剂。

水溶性咪唑啉及其衍生物以其独特的分子结构，对于钢铁具有优良的缓蚀性能，在石油工业中具有广泛的应用。文献[14]根据川西某气田的CO_2腐蚀体系情况，合成双咪唑啉季铵盐和多单元吗啉环己胺缓蚀剂，再与含硫有机物及炔醇类缓蚀剂进行复配，得到气液两相缓蚀剂SM-12B，通过失重法研究在模拟气田采出液中的缓蚀率，分析数据发现，使用400 g/L的SM-12B缓蚀剂，在温度为90~110 ℃之间，气相缓蚀率达到71.57%以上，液相缓蚀率达到80.82%以上。但是，该气液两相缓蚀剂仅适用于环境温度为90 ℃左右、CO_2分压低于1.0 MPa的CO_2腐蚀环境。王观军等[15]合成一种新型含硫磷的水溶性咪唑啉类缓蚀剂HGY-T，通过高温高压动态测试和电化学方法研究了HGY-T对N80钢在80 ℃、CO_2分压为1 MPa高矿化度的模拟油田水中的缓蚀性能，测得当缓蚀剂用量为50 mg/L时缓蚀率达到95%。上述两种缓蚀剂对高温高压环境下的CO_2腐蚀都有良好的抑制作用，在油气田实际生产中具有良好的应用前景，尤其是缓蚀剂SM-12B可同时有效抑制气液两相CO_2腐蚀。

在CO_2高压环境下，油溶型缓蚀剂的效果比水溶型缓蚀剂的好[16]，徐海升等[17]采用挂片失重法在高温高压釜中进行动态挂片实验验证了这一点，测得H5和H6两种缓蚀剂在环境温度为60 ℃、体系总压1.8 MPa、CO_2分压为0.58 MPa条件下，液相缓蚀率分别为78.3%和71.7%，气相缓蚀率分别为59.2%和56.5%，两者在气相和液相中缓蚀效果相对较好。张玉芳等[18]利用高温高压釜，保持釜内压强3 MPa，分别在50、90和110 ℃下，动态法测试对N80、P110和C90油管钢的缓蚀率均高达95%以上，完全可以满足3种材料在高温高压井下抗CO_2腐蚀的需要。

随着科技进步，绿色环保型缓蚀剂的开发研究受到越来越多的学者关注。Rivera-Grau等[19]利用改性椰子油合成一种新型咪唑啉缓蚀剂，并在50 ℃、3%NaCl饱和CO_2溶液中，通过各种电化学方法测试了其缓蚀率，并与商业咪唑啉缓蚀剂做了比较。结果显示，商业咪唑啉缓蚀剂降低腐蚀速度40%以上，而改性椰子油合成的新型咪唑啉缓蚀剂降低腐蚀速度达85%以上，是一种应用前景广阔的绿色缓蚀剂。

CO_2腐蚀是个复杂的过程，影响碳钢腐蚀的因素很多[19]，例如流速、腐蚀介质的成分等。静态条件下抗高温高压CO_2腐蚀的咪唑啉缓蚀剂研究较多，而动态条件下研究较少。Ortega-Toledo等[20]测试分析了X-120钢在50 ℃、3%NaCl饱和CO_2溶液中，不同转速、不同浓度下，羧乙基咪唑啉缓蚀剂的缓蚀效率。分析数据发现，实验范围内，缓蚀效率与缓蚀剂浓度成正比，在500 r/min时腐蚀速率最低。Villamizar等[21]通过测试3种咪唑啉缓蚀剂HEI-18、AEI-18和AMEI-18的EIS曲线，分析比较了它们在50 ℃、3%NaCl饱和CO_2溶液中的缓蚀性能。当腐蚀介质中无油相时，缓蚀效率偏低，三者均在80%左右。但是，腐蚀介质中有油相存在时缓蚀率有大幅度提高，

三者缓蚀率均在99%以上。

3 有机胺类缓蚀剂

目前，缓蚀效果较好的有机胺类缓蚀剂主要属于吸附型，如链状有机胺及其衍生物[22]。有机胺类缓蚀剂中应用广泛的主要是酰胺类缓蚀剂，由于分子中酰胺键的存在，使之在较宽的pH值范围内耐水性良好，且毒性低、生物降解性好，可用于酸性介质、中性介质及大气腐蚀介质中，特别适合于油气田中抗CO_2腐蚀。

李言涛等[23]针对川西气田的CO_2腐蚀问题，研制了一种新型的抗CO_2腐蚀缓蚀剂MC-1，其主要成分是咪唑啉酰胺和有机胺类化合物。利用极化曲线法和电化学阻抗法对缓蚀剂在高温高压条件下CO_2饱和模拟气井产出水中的缓蚀性能进行测试，在100 ℃高温、CO_2分压为1.88 MPa条件下，将试样N80钢在腐蚀介质中浸泡52 h，测得缓蚀率为90.99%。

脂肪酸衍生物作为中性水溶液介质中钢铁缓蚀剂是一种很好的金属腐蚀缓蚀剂，一直受到各国学者关注[24-26]。文献[25]基于棕榈油合成磺化脂肪酸二乙醇胺络合物Sulfonatooxy fatty acid-diethanolamine complex，(SFD)磺化脂肪酸单乙醇胺络合物(SFM)铵磺化脂肪酸(AFA)钠磺化脂肪酸(SFA)钾磺化脂肪酸(PFA)等5种高纯度脂肪酸衍生物表面活性剂，通过极化曲线和电化学阻抗谱法研究了这5种表面活性剂在50 ℃、0.9 MPa、1%NaCl饱和CO_2溶液中的缓蚀率。实验数据表明，在实验范围内，5种缓蚀剂的缓蚀率与缓蚀剂浓度成正比，在浓度为100 mg/L时，缓蚀率最高，均在98%左右。量子化学计算结果表明五种缓蚀剂的效率为SFD＞SFM＞AFA＞SFA＞PFA，可见，此类表面活性剂是碳钢抗CO_2腐蚀的一种高效、安全、成本低的优良缓蚀剂，应用前景广阔。

此外，越来越多的研究者尝试用脂肪酸酰胺来提供化学阻挡层以增强配制品的缓蚀性能[27]。油酸酰胺是一种重要的长链脂肪酰胺，杜海燕等[28]以油酸为原料制备合成油酸酰胺，并利用高温高压釜对该缓蚀剂的性能进行测试，在温度60 ℃、压力0.5 MPa的条件下，将试样X65钢在模拟油田采出液中浸泡24 h，测试材料腐蚀失重情况，对比加入和未加入制备的油酸酰胺X65钢腐蚀速率，缓蚀率高达84.33%，对低碳钢有明显的缓蚀性能。陈国浩等[29]合成了一种改性聚酰胺类缓蚀剂，通过动态失重法和动电位极化曲线法评价了其在CO_2腐蚀体系中对N80钢的缓蚀性能。在动态高压釜中保持CO_2压力2 MPa，80 ℃高温下在模拟某油田产出水中浸泡24 h，加入改性聚酰胺100 mg/L时，腐蚀速率明显下降，缓蚀率达到87.01%，加入500 mg/L时，缓蚀率高达98%，该缓蚀剂对CO_2腐蚀具有良好的抑制作用。

国内油气田使用的酰胺类缓蚀剂有CT2-4油气井缓蚀剂、GP-1缓蚀剂、KW-204缓蚀剂，可以说目前油气田中抗CO_2腐蚀的酰胺类缓蚀剂不是很多，开发此类缓蚀剂还有很广阔的前景。

4 季铵盐类缓蚀剂

季铵盐类缓蚀剂主要靠氮原子吸附成膜，季铵盐上的阳离子被金属表面吸附，在金属表面形成致密、完整的覆盖膜，从而能够有效地抑制阳极反应；阴离子对阳离子缓蚀剂的静电吸附也有较大的影响。国内对季铵盐类缓蚀剂研究报道较多。

王荣良等[30]设计合成季铵盐缓蚀剂9912-1，在常压、90 ℃温度下测试单独使用该缓蚀剂的缓蚀性能，用量为1800 mg/L时缓蚀率最大为95.43%，而且与硫脲复配可以降低该季铵盐使用量，缓蚀率可达到90.31%，只是缺乏高压条件下的实验数据，有进一步的发展前景，获得更理想的缓蚀效果。杨怀玉等[32]在80 ℃、CO_2分压为10 MPa下模拟油田产出水，试样选用N80钢，研究IMG-871-G缓蚀剂的缓蚀性能，发现随着缓蚀剂浓度增加，试样的腐蚀速率可降低到0.067 mm/a，结合电化学测试及阻抗测量实验结果，该缓蚀剂可有效抑制高矿化水中高分压CO_2的腐蚀。此外，杨怀玉等[31]对市售的缓蚀剂IMC-871、IMC-80进行筛选评价，实验温度为30~70 ℃，对X52钢采用失重法在高温高压釜中进行实验，在试验温度和实验压力范围内，均表现出较好的缓蚀性能，并有效控制了介质的腐蚀。黄金营等[32]以甲硝唑为母体，以环氧氯丙烷为联接剂合成了一种含甲硝唑杂环的双季铵盐化合物MBQA，实验试样采用Q235钢，实验温度30~70 ℃，在模拟油田水介质中加入缓蚀剂浓度为200 mg/L，缓蚀率随温度升高而降低，但是均保持在90%以上，且在实验温度范围内，缓蚀率受温度影响较小，缓蚀性能优良。

相对于国内，目前国外研究主要是25 ℃、常压条件下季铵盐缓蚀剂的缓蚀性能，而关于抗CO_2高温高压腐蚀的季铵盐类缓蚀剂，尚未见相关报道。

5 其他类型缓蚀剂

虽然针对油气田CO_2腐蚀环境研究最多的主要是上述3种缓蚀剂，但是仍有许多学者对松香胺类、噻唑类等缓蚀剂进行了详细研究。

松香胺是一种主要含有烷基氢化菲结构的树脂胺，其分子结构中庞大的、非极性三环结构具有良好的疏水性，而极性的胺基部分又具有亲水性，因此松

香胺属于典型的两亲分子。松香胺类缓蚀剂对钢铁在盐酸中的腐蚀有良好的缓蚀作用，但是对其在CO_2腐蚀体系中的缓蚀性能研究报道较少。李国敏等[33,34]对松香胺经改性后研制的一种新型水溶性松香胺衍生物缓蚀剂 (简称RA缓蚀剂)，在高温高压釜中模拟油田CO_2腐蚀环境，实验材料选用N80钢，在80 ℃高温、CO_2分压1 MPa条件下，通过电化学测量法分析实验数据发现，浓度为30 mg/L时缓蚀率可达90%以上。

噻唑类缓蚀剂是含有N和S原子的杂环缓蚀剂，具有功能多、有效性高、适应性强、毒性低等优点。赵景茂等[35]将二氢噻唑衍生物和硫脲、表面活性剂复配得到一种新型复合缓蚀剂，在高压静态腐蚀试验釜中，60 ℃、CO_2分压0.6 MPa以及饱和CO_2的3%NaCl腐蚀介质条件下，测得液相中缓蚀率在98%以上，在气相中缓蚀率为76%，对CO_2气液两相腐蚀都有很好的抑制作用，而且用量较少。

6 结语与展望

抗高温高压CO_2缓蚀剂的研究为保障油气田的安全做出了重要贡献，但是，目前仍存在一些不足之处。国内系统研究油气田中高温高压抗CO_2腐蚀的缓蚀剂并不是很多，实际应用的抗CO_2缓蚀剂大多数是针对某一油气田的特殊环境而研制开发的，已有的实验数据多为在实验室模拟腐蚀环境下测试所得，缺少现场数据验证。

此外，已研制出的缓蚀剂中，效果较好的抗高温高压CO_2缓蚀剂多数为单相缓蚀剂，而在气液两相中均能获得良好缓蚀效果的双相缓蚀剂较少。咪唑啉类缓蚀剂研究最为深入，种类繁多，但是由于各大油气田腐蚀环境复杂，没有适宜所有油气田的通用缓蚀剂。

未来几年关于高温高压环境下CO_2缓蚀剂的研究主要集中在以下几个方面：(1) 重视缓蚀剂复配技术，探索更多适用于气/液/固腐蚀环境的多相缓蚀剂；(2) 开发低毒、高效、生物降解性好的环保型缓蚀剂；(3) 不断探索新类型缓蚀剂，丰富现有缓蚀剂产品体系；(4) 进行现场实验，检验实验室产品的现场可行性。

参考文献

[1] Hesjevik S M, Olsen S, Seiersten M. Corrosion at high CO_2 pressure [A]. Corrosion/2003 [C]. California: NACE International, 2003, 0334

[2] 施黛艳, 张金钟, 匡飞. 高温高压下CO_2腐蚀的研究现状 [J]. 化学工程与装备, 2010, (11): 129

[3] Kermani M B, Morshed A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production-a compendium [J]. Corrosion, 2003, 59(8): 659

[4] George K S, Nešic S. Investigation of carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of acetic acid: Part 1-Basic mechanisms [J]. Corrosion, 2007, 63(2): 178

[5] 马能平. 影响石油长输管道二氧化碳腐蚀的因素分析与控制措施 [J]. 化学工程与装备, 2010, (2): 81

[6] 杨怀玉, 曹殿珍. 海底管线内防腐蚀缓蚀剂的筛选优化 [J]. 腐蚀与防护, 1997, 18(4): 13

[7] Mustafa A H, Ari-Wahjoedi B, Ismail M C. Inhibition of CO_2 corrosion of X52 steel by imidazoline-based inhibitor in high pressure CO_2-water environment [J]. J. Mater. Eng. Perform., 2013, 22(6): 1748

[8] Wang B, Du M, Zhang J, et al. Electrochemical and surface analysis studies on corrosion inhibition of Q235 steel by imidazoline derivative against CO_2 corrosion [J]. Corros. Sci., 2011, 53(1): 353

[9] Zhao J M, Lu Y, Liu H X. Corrosion and control of P110 oil tube steel in CO_2-saturated solution [J]. Corros. Eng. Sci. Technol., 2008, 43(4): 313

[10] Okafor P C, Liu C B, Zhu Y J, et al. Corrosion and corrosion inhibition behavior of N80 and P110 carbon steels in CO_2-saturated simulated formation water by rosin amide imidazoline [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2011, 50(12): 7273

[11] 尹成先, 冯耀荣, 兰新哲. 一种新型固体缓蚀剂的合成及性能 [J]. 精细化工, 2006, 23(9): 930

[12] 尹成先, 兰新哲, 冯耀荣. 在高CO_2和Cl^-环境中硫脲的缓蚀行为及其对复配缓蚀剂性能的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 334

[13] 梅平, 艾俊哲, 陈武. 抑制二氧化碳腐蚀的缓蚀剂及其缓蚀机理研究 [J]. 石油学报, 2004, 25(5): 104

[14] 刘多容, 孙勇, 潘成松. CO_2气液两相缓蚀剂SM-12B及其性能评价 [J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4): 281

[15] 王观军, 何金杯, 刘晶姝. 高温高压二氧化碳介质中改性咪唑啉的缓蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 36

[16] Papavinasam S, Revie R W, Attard M, et al. Comparison of laboratory methodologies to evaluate corrosion inhibitors for oil and gas pipelines [J]. Corrosion, 2003, 59(10): 897

[17] 徐海升, 李谦定, 薛岗林. 油气田缓蚀剂的筛选与评价 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2009, 26(2): 4

[18] 张玉芳, 路民旭, 李爱兰. TG100缓蚀剂的缓蚀行为研究 [J]. 油气储运, 2001, 20(6): 44

[19] Rivera-Grau L M, Casales M, Regla I, et al. CO_2 corrosion inhibition by imidazoline derivatives based on coconut oil [J]. Int. J. Electrochem. Sci., 2012, 7: 13044

[20] Ortega-Toledo D M, Gonzalez-Rodriguez J G, Casales M, et al. CO_2 corrosion inhibition of X-120 pipeline steel by a modified imidazoline under flow conditions [J]. Corros. Sci., 2011, 53(11): 3780

[21] Villamizar W, Casales M, Gonzales-Rodriguez J G, et al. An EIS study of the effect of the pedant group in imidazolines as corrosion inhibitors for carbon steel in CO_2 environments [J]. Mater. Corros., 2006, 57(9): 696

[22] Vigdorovich V I, Sinyutina S E, Tsygankova L E, et al. Effect of hydroxyethylated amines on the corrosion and hydrogenation of carbon steel [J]. Prot. Met., 2004, 40(3): 264

[23] 李言涛, 张玲玲, 郑凤. 用于川西气田CO_2腐蚀控制的缓蚀剂性能的研究 [J]. 材料保护, 2008, 41(5): 70

[24] Shan C, Wu A, Chen Q. The behavior of diffusion and permeation of tritium through 316L stainless steel [J]. J. Nucl. Mater., 1991, 179: 322

[25] Handy M, Abd El L, Abbasov V M, et al. Inhibition of carbon steel corrosion in CO_2-staurated brine using some newly surfactants based on plam oil: Experimental and theoretical investigations [J]. Mater. Chem. Phys., 2013, 142: 502

[26] Hegazy M A, Zaky M F. Inhibition effect of novel nonionic surfactants on the corrosion of carbon steel in acidic medium [J]. Corros. Sci., 2010, 52(4): 1333

[27] Forcey K S, Perujo A, Reiter F, et al. The formation of tritium permeation barriers by CVD with coating of TiN+TiC [J]. J. Nucl. Mater., 1993, 200(3): 417

[28] 杜海燕, 路民旭, 吴荫顺. 油酸酰胺的合成及其性能研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 370

[29] 陈国浩, 陈波, 赵景茂. 改性聚酰胺对CO_2环境中N80钢的缓蚀作用 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(6): 444

[30] 王荣良, 张英菊. 缓蚀剂9912-1在 CO_2-H_2O 介质中缓蚀性能的研究 [J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(9): 375

[31] 杨怀玉, 时维才. CO_2饱和溶液中缓蚀剂的电化学行为及缓蚀性能 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(4): 211

[32] 黄金营, 郑家燊, 魏红飚. 含杂环双季铵盐的合成及其缓蚀性能的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(5): 272

[33] 李国敏, 李爱魁, 郭兴蓬. 松香胺类RA缓蚀剂对碳钢在高压CO_2体系中缓蚀机理研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 125

[34] Li G M. Inhibition of CO_2 corrosion of carbon steel by rosin amide [J]. Anti-corros. Meth. Mater., 2003, 50(6): 410

[35] 赵景茂, 顾明广, 左禹. CO_2腐蚀的气液双相新型缓蚀剂的开发 [J]. 腐蚀与防护, 2006, 26(10): 436